یک روش ترکیبی جدید برای مدل‌سازی سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی*

(یادداشت پژوهشی)

ایمان کاردان[۱]   علیرضا اکبرزاده[۲]

چکیده *برخلاف روبات‌های سری، مسئلهٔ سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی بسیار پیچیده است و در حالت کلی نمی‌توان یک پاسخ تحلیلی برای آن پیدا کرد. به‌همین دلیل در بیشتر موارد از روش‌های عددی برای حل این مسئله استفاده می‌شود که نسبتاً زمان‌بر می‌باشند. از طرفی کاهش زمان صرف‌شده برای محاسبات سینماتیکی، در کاربردهایی مانند کنترل بلادرنگ، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد. در این مقاله، با ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و یک تکنیک عددی مرتبه ۳، یک روش ترکیبی جدید برای تحلیل سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی پیشنهاد شده‌است که سرعت حل این مسئله را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. در این روش ابتدا با استفاده از شبکه‌های عصبی یک پاسخ تقریبی از مسئلهٔ سینماتیک مستقیم روبات ایجاد می‌شود. سپس این پاسخ تقریبی به‌عنوان حدس اولیهٔ روش عددی مرتبه ۳ در نظر گرفته می‌شود که با حل معادلات سینماتیک مستقیم، پاسخ مورد نظر را با دقت دل‌خواه محاسبه می‌کند. کارآیی روش پیشنهادی در ارتباط با یک روبات موازی فضایی از نوع ۳-PSP بررسی شده و نشان داده شده است که استفاده از این روش می‌تواند در دقت‌های بالا تعداد تکرارها را به‌میزان ۳۵ درصد و زمان تحلیل سینماتیک مستقیم روبات را به اندازهٔ ۱۲ درصد کاهش دهد.*

واژه‌های کلیدی سینماتیک مستقیم، روبات موازی، شبکهٔ عصبی، روش عددی مرتبه ۳، روبات موازی 3-PSP.

A New Hybrid Strategy for Modeling of Forward Kinematics of Parallel Robots

I. Kardan   A. Akbarzadeh

Abstract *Unlike serial manipulators, forward kinematic problem (FKP) of parallel robots is highly complicated and its analytical solution is not generally le. Therefore, in most cases numerical methods are used to solve this problem which are relatively time consuming. On the other hand, reducing the duration of FKP analysis is an essential task for applications like real-time control. In this paper, artificial neural networks and a 3rd-order numerical algorithm are combined and a new hybrid strategy is proposed for forward kinematics analysis of parallel manipulators which significantly increases the speed of the FKP solution. In the proposed method, an approximate solution of the FKP is first produced by the neural network. This solution is next considered as an initial guess for the 3rd-order numerical technique which solves the nonlinear forward kinematics equations and obtains the answer with a desired level of accuracy. The proposed method is applied to a spatial 3-PSP parallel manipulator. The results show that using this method will lead to a 35 percent reduction in number of iterations and a 12 percent reduction in the FKP analysis time, while maintaining high level of solution accuracy.*

Key Words Artificial Neural Networks, Parallel Robot, Forward Kinematics Analysis, 3rd-order Numerical Algorithm

.

*تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۳/۲۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۷/۶ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استاد، گروه مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. ali_akbarzadeh@um.ac.ir

مقدمه

امروزه روبات‌های موازی به‌واسطهٔ ویژگی‌های منحصربه‌فردی هم‌چون دقت و نسبت بار به وزن بالا کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند که از آن میان می‌توان به شبیه‌سازها [1]، ماشین‌ابزارها [2] و ماشین‌های کنترل عددی [3] اشاره کرد.

برخلاف روبات‌های سری، مسئلهٔ سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی بسیار پیچیده است و به‌جز در موارد خاص یک حل تحلیلی برای آن وجود ندارد. به‌همین دلیل در اکثر موارد از روش‌های عددی برای پیدا کردن پاسخ‌های سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی استفاده می‌شود [4-10]. از میان انواع تکنیک‌های عددی روش نیوتن-رافسون به‌صورت گسترده‌ای در تحلیل سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی مورد استفاده قرار گرفته است [5-10]. مشکل اساسی این روش در وابستگی شدید به حدس اولیه می‌باشد به‌گونه‌ای که به‌ازای برخی از حدس‌های اولیه ممکن است این روش واگرا شود و کارایی خود را از دست بدهد. برای رفع این مشکل روش‌های مختلفی مانند نیوتن-رافسون مقاوم [11]، نیوتن-رافسون فراگیر [12] و نیوتن-رافسون فراگیر تغییریافته [13] پیشنهاد شده‌اند. با این حال و باوجود حل مشکل واگرایی در این روش‌ها، اگر حدس اولیه فاصلهٔ زیادی با پاسخ مسئله داشته باشد زمان لازم برای هم‌گرا شدن الگوریتم افزایش خواهد یافت.

یک راهکار مؤثر در افزایش سرعت الگوریتم‌های عددی، تهیهٔ حدس‌های اولیهٔ مناسب برای آنها می‌باشد. به‌همین منظور گیوز و احمد [14] یک روش ترکیبی را پیشنهاد دادند که در آن حدس اولیهٔ مناسب برای حل سینماتیک معکوس روبات‌های سری توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی ایجاد می‌شود. پاریک و لام [15] این روش ترکیبی را به حل معادلات سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی تعمیم دادند و کارایی آن را در افزایش سرعت تحلیل سینماتیکی این روبات‌ها نشان دادند. آنها با اعمال این روش به روبات موازی استوارت-گوف نشان دادند که استفاده از روش ترکیبی، زمان حل مسئلهٔ سینماتیک مستقیم روبات مذکور را به دو سوم زمان لازم برای حل همین مسئله با استفاده از الگوریتم نیوتن-رافسون کاهش می‌دهد. روشن است که الگوریتم نیوتن-رافسون دارای سرعت هم‌گرایی از مرتبهٔ ۲ می‌باشد [16]. بنابراین در صورت استفاده از الگوریتم‌هایی با مرتبهٔ هم‌گرایی بیشتر از ۲ می‌توان با تعداد تکرارهای کمتری به دقت مورد نظر دست یافت و سرعت حل مسئله را افزایش داد.

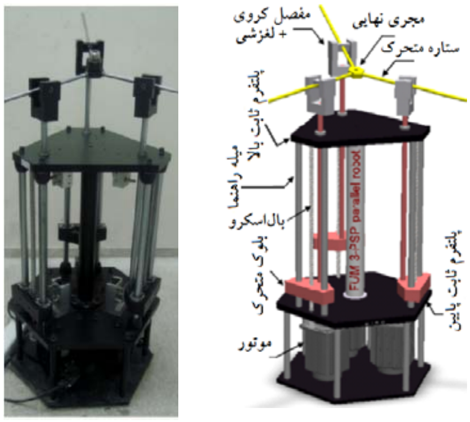
در مقالهٔ حاضر با ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و یک تکنیک عددی با سرعت هم‌گرایی مرتبهٔ ۳ [17] یک روش ترکیبی جدید برای حل مسئلهٔ سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی پیشنهاد داده شده است. در این روش ابتدا شبکهٔ عصبی مصنوعی یک حدس اولیه از پاسخ مسئله ایجاد می‌کند و سپس تکنیک عددی مرتبهٔ ۳ با استفاده از این حدس اولیه، پاسخ مسئلهٔ سینماتیک مستقیم روبات را با دقت مورد نظر محاسبه می‌نماید.

با اعمال روش ترکیبی جدید به سینماتیک مستقیم یک روبات موازی فضایی از نوع ۳-PSP، عملکرد این روش نسبت به روش ترکیبی [15] مقایسه شده و نشان داده شده است که روش پیشنهادی با تعداد تکرار کمتر و در زمان کوتاه‌تری به دقت مطلوب دست پیدا می‌کند.

در این مقاله برای مقایسهٔ عملکرد روش‌های مختلف تحلیل سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی، مسئلهٔ سینماتیک مستقیم روبات موازی3-PSP به‌عنوان یک نمونهٔ خاص مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین پیش از پرداختن به جزئیات روش‌های مذکور، در این بخش توضیحات مختصری در ارتباط با ساختمان و سینماتیک مستقیم این روبات ارائه می‌گردد. توضیحات کامل‌تر در ارتباط با روبات 3-PSP در [۱۸] آورده شده است.

ساختمان روبات موازی فضایی 3-PSP

روبات موازی 3-PSP یک روبات موازی کامل با سه درجه آزادی در فضا است و همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، دارای یک لینک متحرک ستاره‌مانند می‌باشد. ستارهٔ مذکور از سه شاخهٔ مختلف تشکیل شده است که با هم زاویهٔ ۱۲۰ درجه می‌سازند. لینک ستاره‌ای از طریق سه بازوی یکسان به پایهٔ روبات متصل شده است. هر بازو به‌ترتیب دارای یک مفصل کشویی محرک، یک مفصل کروی غیر محرک و یک مفصل کشویی غیرمحرک می‌باشد. بنابراین هر کدام از بازوها دارای ساختار PSP می‌باشند که در کنار هم ساختار موازی 3-PSP را تشکیل می‌دهند.

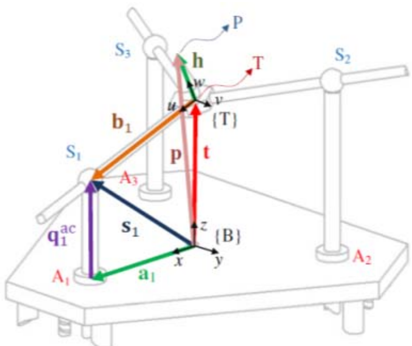


شکل ۱ روبات موازی 3-PSP [۱۸]

سینماتیک مستقیم روبات موازی 3-PSP

در شکل (۲) دستگاه‌های مختصات و پارامترهای لازم برای توصیف سینماتیک روبات موازی 3-PSP نمایش داده شده است. دستگاه مختصات $B\{x,y,z\}$ متصل به صفحهٔ ثابت و در مرکز مثلث $A_1A_2A_3$ و دستگاه $T\{u,v,w\}$ متصل به لینک ستاره‌ای و در مرکز آن در نظر گرفته شده‌اند. بردار a_i محل عملگر خطی iام را در صفحهٔ ثابت نسبت به مرکز دستگاه مختصات B نشان می‌دهد. هم‌چنین بردار h محل نوک ابزار را نسبت به مرکز لینک ستاره‌ای نشان می‌دهد. این دو بردار وابسته به ساختمان روبات هستند و در نتیجه از قبل مشخص می‌باشند.

بردار $\mathbf{q}_i^{ac}$ نشان‌دهندهٔ میزان جابه‌جایی مفاصل محرک، بردارهای t و p به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ محل مرکز لینک ستاره‌ای و نوک ابزار نسبت به مرکز دستگاه B و بردارهای b_i و S_i به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ محل مفصل کروی iام نسبت به مرکز دستگاه T و B می‌باشند. با توجه به شکل (۲) می‌توان برای هر بازو یک حلقهٔ بسته تشکیل داد و نوشت:



شکل ۲ پارامترهای لازم در سینماتیک روبات 3-PSP [۱۸]

$$ {}^{B}\mathbf{a}_i + {}^{B}\mathbf{q}_i^{ac} = {}^{B}\mathbf{b}_i + {}^{B}\mathbf{t} \qquad (۱)$$

با توجه به روابط میان بردارها که در شکل (۲) مشخص می‌باشد، معادلهٔ (۱) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$ {}^{B}\mathbf{a}_i + {}^{B}\mathbf{q}_i^{ac} = {}^{B}_{T}\mathbf{R}\left({}^{T}\mathbf{b}_i - {}^{T}\mathbf{h}\right) + {}^{B}\mathbf{p} \qquad (۲)$$

که ${}^{B}_{T}\mathbf{R}$ ماتریس دوران از دستگاه B به T می‌باشد.

$$ {}^{B}_{T}\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\lambda c\varphi & -s\lambda c\theta + c\lambda s\varphi s\theta & s\lambda s\theta + c\lambda s\varphi c\theta \\ s\lambda c\varphi & c\lambda c\theta + s\lambda s\varphi s\theta & -c\lambda s\theta + s\lambda s\varphi c\theta \\ -s\varphi & c\varphi s\theta & c\varphi c\theta \end{bmatrix} \qquad (۳)$$

در ماتریس فوق‌θ، φ و λ زوایای اویلر دستگاه T نسبت به دستگاه B به ترتیب حول محورهای x، y و z بوده و $s\theta=\sin(\theta)$ و $c\theta=\cos(\theta)$ می‌باشند.

رابطهٔ (۲) نشان دهندهٔ ۳ معادلهٔ برداری می‌باشد که مجموعاً یک دستگاه معادلات غیرخطی با ۹ معادله و ۹ مجهول را تشکیل می‌دهد. در مسئلهٔ سینماتیک مستقیم روبات 3-PSP میزان جابه‌جایی مفاصل کشویی محرک $(q_3^{ac}, q_2^{ac}, q_1^{ac})$ به‌عنوان ورودی مسئله معلوم است و سایر مجهولات از حل دستگاه معادلات (۲) محاسبه می‌گردند. مجهولات این مسئله عبارتند از:

$$\begin{aligned} x &= [x^1, x^2, \ldots, x^9]^T \\ &= [x_T, y_T, z_T, \theta, \varphi, \lambda, b_1, b_2, b_3]^T \end{aligned} \quad (۴)$$

توضیحات بیشتر در ارتباط با سینماتیک مستقیم و معکوس روبات در [18,19] آورده شده و نشان داده شده است که بر خلاف اکثر روبات‌های موازی مسئلهٔ سینماتیک مستقیم روبات 3-PSP تنها دارای یک جواب حقیقی قابل قبول می‌باشد.

روش ترکیبی جدید برای تحلیل سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی

در این مقاله مشابه با روش ترکیبی [15] از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای ایجاد حدس‌های اولیه استفاده می‌شود. با این تفاوت که در این‌جا، برای کاهش زمان مورد نیاز برای حل مسئله، روش نیوتن-رافسون با یک روش عددی با هم‌گرایی مرتبهٔ ۳ [17] جایگزین شده است.

روش عددی با هم‌گرایی مرتبهٔ ۳. چان [20] با استفاده از روش تجزیهٔ آدومیان چندین الگوریتم عددی را با درجه‌های هم‌گرایی متفاوت بررسی کرده است. از این میان درویشی و براتی [17] یک روش با هم‌گرایی مرتبه ۳ را که نیازی به محاسبهٔ مشتق دوم معادلات ندارد توسعه داده و برای حل دستگاه معادلات غیرخطی استفاده کرده‌اند. در این مقاله نیز از الگوریتم شرح داده شده در [17] برای حل دستگاه معادلات غیرخطی مربوط به سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی بهره گرفته شده است.

یک دستگاه معادلهٔ غیرخطی با n معادله و n مجهول را به‌صورت رابطهٔ (۵) در نظر بگیرید:

$$\mathbf{F}(x) = 0 \quad (۵)$$

که در آن $\mathbf{F}^{n\times 1}: \Omega \subseteq \Re^n \to \Re^n$ یک تابع برداری غیرخطی و $x^{n\times 1} = \left[x^1, x^2, \ldots, x^n\right]^T$ بردار پارامترهای سینماتیکی روبات می‌باشد. درویشی و براتی [17] برای حل دستگاه معادلات (۵)، رابطهٔ تکراری (۶) را پیشنهاد داده و نشان داده‌اند که سرعت هم‌گرایی این الگوریتم از مرتبهٔ ۳ می‌باشد.

$$\begin{aligned} x_{m+1} &= x_m - \mathbf{F}'(x_m)^{-1}\left(\mathbf{F}(x_m) + \mathbf{F}(x^*_{m+1})\right) \\ x^*_{m+1} &= x_m - \mathbf{F}'(x_m)^{-1}\mathbf{F}(x_m) \end{aligned} \quad (۶)$$

در روابط فوق $\mathbf{F}'$ ماتریس ژاکوبین سیستم معادلات (۵) با ابعاد n×n می‌باشد و

$$\left(\mathbf{F}'\right)^{i,j} = \frac{\partial \mathbf{F}^i}{\partial x^j} \quad (۷)$$

این الگوریتم یک حدس اولیه از پاسخ به‌صورت بردار x_0 انتخاب می‌کند و با تکرار رابطهٔ (۶) پاسخ مسئله را با دقت مورد نظر محاسبه می‌کند. الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که رابطهٔ (۸) برقرار گردد که در آن E_{max} حداکثر خطای مجاز پارامترها می‌باشد.

$$\begin{aligned} \|x_{n+1} - x_n\|_\infty &< E_{\mathbf{max}} \\ \|x\|_\infty &= \mathbf{max}\left(|x^1|, \ldots, |x^n|\right) \end{aligned} \quad (۸)$$

اثبات هم‌گرایی این الگوریتم عددی به‌همراه اثبات مرتبهٔ هم‌گرایی آن، در مرجع [17] آورده شده است. هرچه حدس اولیه به پاسخ مسئله نزدیک‌تر باشد، تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به دقت مطلوب کمتر می‌باشد و زمان حل کاهش خواهد یافت. در این مقاله از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تهیهٔ حدس‌های اولیهٔ مناسب استفاده شده است.

شبکه‌های عصبی مصنوعی

مشکلات موجود در روش‌های عددی سبب شده است که در سال‌های اخیر محققان تلاش‌های خود را بر یافتن روش‌هایی کارآمدتر برای حل سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی متمرکز نمایند. در این میان شبکه‌های عصبی به‌دلیل توانایی بالا در تخمین روابط غیرخطی و استفاده آسان به‌صورت گسترده‌ای مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [21-25].

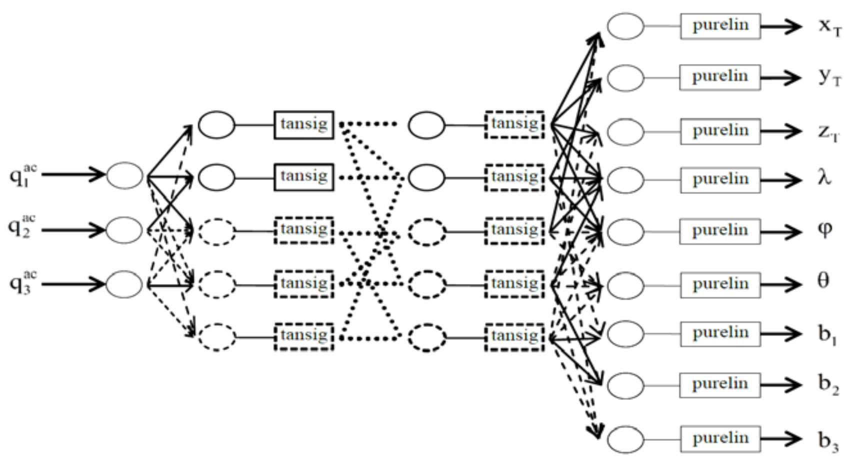
برای مدل‌سازی سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی باید شبکهٔ عصبی را به‌گونه‌ای طراحی کرد که میزان جابه‌جایی مفاصل محرک را در ورودی دریافت کند و سایر پارامترهای مرتبط با سینماتیک روبات را در خروجی تخمین بزند. به‌عنوان مثال در مورد روبات 3-PSP پارامترهای $(q_3^{ac}, q_2^{ac}, q_1^{ac})$ به‌عنوان ورودی و پارامترهای $(x_T, y_T, z_T, \theta, \varphi, \lambda, b_1, b_2, b_3)$ به‌عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته می‌شوند.

در روبات موازی 3-PSP با استفاده از رویکردی که در [18,19] آورده شده است می‌توان یک جواب منحصر به فرد برای مسئلهٔ سینماتیک مستقیم پیدا کرد. هرچند که پیچیدگی‌های موجود سبب زمان‌بر شدن حل مسئله سینماتیک مستقیم این روبات می‌شوند اما با توجه به منحصر به فرد بودن جواب، در کاربردهایی مانند تهیهٔ داده‌های لازم برای آموزش شبکهٔ عصبی که زمان لازم در اختیار می‌باشد، می‌توان از این روش استفاده کرد.

پس از تهیهٔ داده‌های آموزشی باید ساختمان مناسب برای شبکهٔ عصبی را انتخاب کرد. در مواردی که تعداد خروجی‌های شبکهٔ عصبی زیاد باشد، می‌توان از دو رویکرد مختلف ACON و OCON استفاده کرد. در رویکرد ACON، مشابه با سیستم‌های کنترلی چند ورودی- چند خروجی، از یک شبکهٔ عصبی واحد برای تخمین تمامی خروجی‌ها استفاده می‌شود. به‌دلیل راحتی کار بیشتر و نیاز به طراحی تنها یک شبکهٔ عصبی، در موارد ممکن این رویکرد ترجیح داده می‌شود. در رویکرد OCON، مشابه با سیستم‌های کنترلی چند ورودی – تک خروجی، برای هر خروجی یک شبکهٔ مجزا در نظر گرفته می‌شود. در این مورد باید تعداد بیشتری شبکهٔ عصبی طراحی کرد که منجر به افزایش حافظه و زمان لازم برای انجام شبیه‌سازی‌ها خواهد شد. این رویکرد در مواردی ترجیح داده می‌شود که منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ای در دقت شبکهٔ عصبی گردد [15]. در این‌جا شبکه‌های عصبی تنها برای ایجاد یک تخمین اولیه از پاسخ مورد استفاده قرار می‌گیرند و در عملکرد این شبکه‌ها مسئلهٔ سرعت بیش از دقت مورد توجه می‌باشد، لذا در این مقاله رویکرد ACON مورد استفاده قرار گرفته است. شمای کلی این شبکه در شکل (۳) نشان داده شده است.

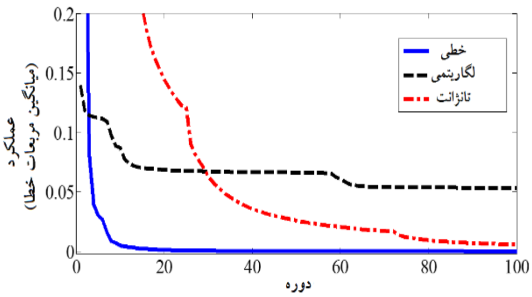
نتایج

در این بخش از روش ترکیبی جدید برای تحلیل سینماتیک مستقیم روبات موازی 3-PSP استفاده شده و کارآیی این روش در مقایسه با روش نیوتن-رافسون و هم‌چنین روش ترکیبی [15] ارزیابی شده است. ابتدا مراحل انتخاب یک ساختار مناسب برای شبکهٔ عصبی شرح داده شده و سپس نتایج حاصل از استفاده از روش ترکیبی جدید آورده شده است.



شکل ۳ نمای کلی از شبکهٔ عصبی مورد استفاده برای تخمین پاسخ سینماتیک مستقیم روبات 3-PSP

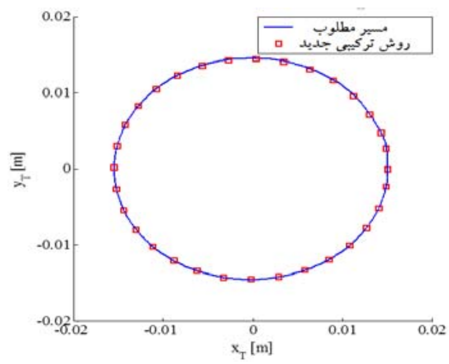
بـرای تهیـهٔ داده‌هـای آموزشـی ابتـدا در محـدودهٔ فضای کاری روبات ۲۰۰ مقدار تصادفی برای هر کـدام از متغیرهـای q_1^{ac}، q_2^{ac} و q_3^{ac} در نظـر گرفتـه شـده و سپس با حـل سـینماتیک مسـتقیم روبـات پارامترهـای سینماتیکی متناظر با هر مجموعهٔ ورودی محاسبه شـده اسـت. بـدین ترتیـب تعـداد ۲۰۰ جفـت ورودی – خروجی برای آموزش شبکهٔ عصبی تهیـه شـده اسـت. تمامی مراحل طراحی، آموزش و ارزیـابی شـبکه‌هـای عصبی در نرم‌افزار متلب انجام شـده اسـت. سـاختمان شبکهٔ عصبی از نوع خورانـد مسـتقیم انتخـاب شـده و برای آموزش شبکه از الگـوریتم لـونبرگ– مـارکوارت استفاده شـده اسـت. بـرای یـافتن یـک شـبکهٔ عصـبی مناسـب کـه سـینماتیک مسـتقیم روبـات 3-PSP را بـا کمتـرین خطـا مـدل‌سـازی کنـد و زمـان لازم بـرای شبیه‌سازی آن خیلی طولانی نباشد، تعداد زیادی شـبکه با ساختارهای گونـاگون (تعـداد لایـه، تعـداد نـرون و توابع فعالیت مختلف) مـورد بررسـی قـرار گرفـت. در بررسی‌هـا مشـخص شـد کـه اگـر تـابع فعالیـت لایـهٔ خروجی به‌صورت purelin در نظر گرفته شود، شـبکه بهتر آموزش می‌بیند و عملکرد بهتری خواهـد داشـت. به‌عنوان نمونه عملکرد شبکه برای یک ساختار ثابـت و سه نمونه تابع فعالیت مختلف در لایـه آخـر در شـکل (۴) نشان داده شده است.



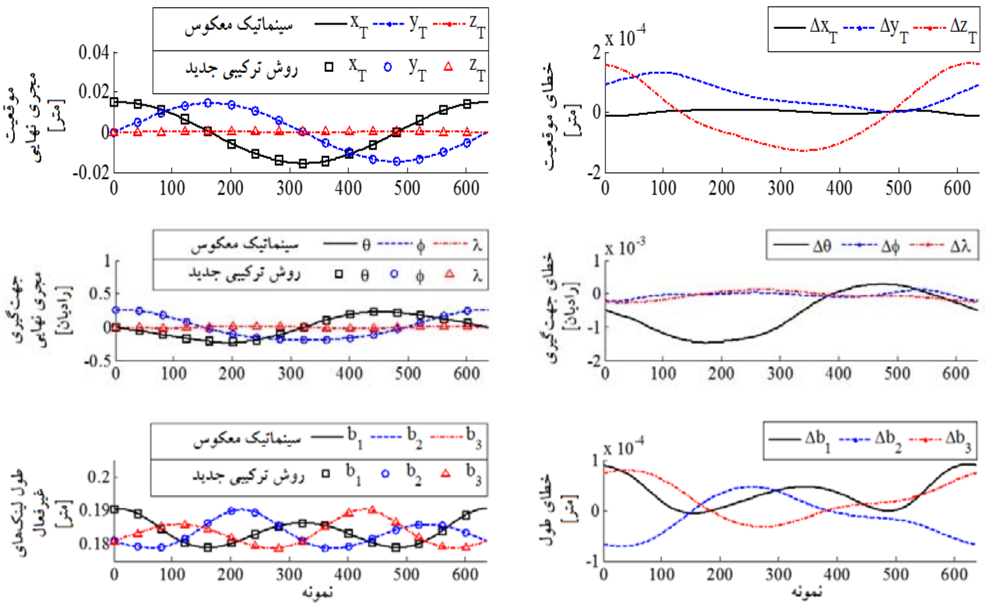
شکل ۴ عملکرد شبکهٔ عصبی با توابع مختلف در لایه آخر

پس از بررسـی عملکـرد تعـداد بسـیار زیـادی از ساختارهای مختلف، یک شبکهٔ عصبی ۴ لایـه (۲ لایـهٔ پنهان)، با ۳ نرون در لایهٔ ورودی، ۵ نرون در هر کـدام از لایه‌های پنهـان و ۹ نـرون در لایـهٔ خروجـی بـرای تخمین پارامترهای سینماتیکی روبـات 3-PSP انتخـاب شده است. تابع فعالیت تمامی لایه‌هـای پنهـان از نـوع tansig و تابع فعالیت لایهٔ خروجی از نـوع purelin در نظر گرفته شده است (شکل ۳).

بـــرای ارزیـــابی عملکـــرد روش پیشـــنهادی، خروجی‌های این روش با تنها یک بار تکرار الگـوریتم عددی در شکل‌های (۶ و ۵) ارائه شده‌اند. در این مورد q_1^{ac}، q_2^{ac} و q_3^{ac} به‌گونه‌ای در نظر گرفته شـده‌انـد کـه مرکز لینک ستاره‌ای مطـابق شـکل (۵) در یـک مسـیر دایـــره‌ای در صــــفحهٔ z=0 حرکـــت کنـــد.



شکل ۵ ارزیابی روش ترکیبی جدید در یک مسیر دایره‌ای



شکل ۶ پارامترهای سینماتیکی در یک مسیر دایره‌ای

مقادیر پارامترهای ورودی لازم برای حرکت در مسیر مذکور از حل سینماتیک معکوس روبات [18, 19] حاصل شده است که در این‌جا به آن اشاره‌ای نشده است. کل مسیر به ۶۳۷ نقطه تقسیم شده و متغیرهای ورودی متناظر با هر کدام از این نقاط با استفاده از سینماتیک معکوس محاسبه شده است. شکل (۶) پارامترهای سینماتیکی حاصل از روش ترکیبی جدید را در مقایسه با مقادیر حاصل از حل سینماتیک معکوس نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، خطای مطلق متغیرهای طولی (مکان عملگر نهایی به‌همراه طول لینک‌های غیرمحرک) از مرتبه 10^{-4} متر و خطای مطلق متغیرهای زاویه‌ای (جهت‌گیری عملگر نهایی) از مرتبهٔ 10^{-3} رادیان می‌باشد. انطباق بسیار خوب مسیر محاسبه شده بر مسیر مطلوب و کوچک بودن مقادیر خطای پارامترهای سینماتیکی حکایت از عملکرد بسیار مطلوب روش پیشنهادی دارد که توانسته است تنها با یک‌بار تکرار دقت‌های خوبی را ایجاد نماید.

برای دست‌یابی به دقت‌های بالاتر باید تعداد

تکرار الگوریتم عددی را افزایش داد. تعداد تکرارهـای لازم برای دست‌یابی به دقت‌های مختلف با اسـتفاده از روش ترکیبـی جدیـد، روش ترکیبـی [15] و روش نیوتن-رافسون در جدول (۱) و شکل (۷) مقایسه شده است.

برای تهیهٔ این جدول ۱۰۰ مقدار تصادفی برای هر کدام از متغیرهای q_1^{ac}، q_2^{ac} و q_3^{ac} در نظر گرفته شـده و تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به دقـت مطلـوب در هـر نمونـه محاسـبه شـده و در کـل نمونـه‌هـا میانگین‌گیری شده است.

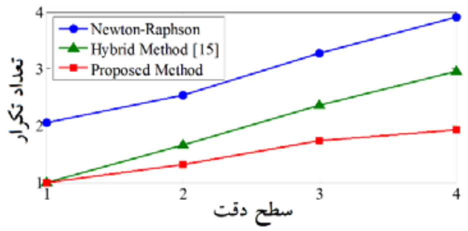
جدول ۱ تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به دقت مطلوب

سطح دقت	معیار توقف E_m^*	میانگین تعداد تکرارها		
		نیوتن-رافسون	ترکیبی [15]	ترکیبی جدید
۱	$۱۰^{-۳}$	۲/۰۵	۱	۱
۲	$۱۰^{-۴}$	۲/۵۳	۱/۶۵	۱/۳۱
۳	$۱۰^{-۵}$	۳/۲۷	۲/۳۵	۱/۷۳
۴	$۱۰^{-۶}$	۳/۹۱	۲/۹۵	۱/۹۲

E_m^* برای متغیرهای طولی، دارای بعد [m] و برای متغیرهای زاویه‌ای دارای بعد [rad] می‌باشد

همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف میـان روش ترکیبی جدید و روش ترکیبـی [15] بـا افـزایش دقـت مورد نیاز، بیشتر می‌شود تا در نهایت در سطح دقـت ۴ این اختلاف تقریباً به ۱ تکرار می‌رسد. از طـرف دیگـر اخـتلاف میـان روش ترکیبـی [15] و روش نیـوتن-رافسون در سـطوح مختلـف تقریبـاً ثابـت اسـت و در حدود ۱ تکرار می‌باشد. این مسئله را می‌توان با در نظر گرفتن مرتبهٔ هم‌گرایی الگوریتم عددی مورد استفاده در روش‌های فـوق توجیـه نمـود. هـر دو روش نیـوتن-رافسـون و ترکیبـی [15] از الگـوریتم عـددی نیـوتن-رافسون با درجهٔ هم‌گرایی از مرتبهٔ ۲ استفاده می‌کنند و در نتیجـه اخـتلاف دو روش تقریبـاً ثابـت اسـت، در حالی‌که روش ترکیبی جدید از یک الگوریتم عددی بـا هم‌گرایی مرتبهٔ ۳ بهره می‌برد و اختلاف ایـن روش بـا سایر روش‌ها با افزایش دقت، بیشتر می‌شود.

لازم به ذکر است که با توجه به ساختمان روبـات در حالتی که لینک ستاره‌ای کـاملاً بـه مـوازات صـفحهٔ ثابت پایینی قرار بگیرد، $b_1 = b_2 = b_3 = a$ خواهد بود و به‌همین دلیـل حـدس اولیـهٔ روش نیـوتن-رافسـون بـه‌صـورت $x = [0,0,0,0,0,0,a,a,a]^T$ در نظـر گرفته شده است. استفاده از حدس اولیهٔ مذکور باعـث افـزایش سـرعت هـم‌گرایـی ایـن روش شـده اسـت به‌گونه‌ای که در این‌جا اختلاف تعداد تکرارهـای میـان روش نیوتن-رافسون و روش ترکیبی بـه حـدود یـک تکرار کاهش یافته در صورتی که در [15] این اختلاف در حدود ۲ تکرار بوده است.



شکل ۷ تعداد تکرارهای مورد نیاز در روش‌های مختلف

زمان مورد نیاز بـرای هـر مرتبـه تکـرار الگـوریتم نیوتن-رافسون در حدود $۶×۱۰^{-۴}$ ثانیه (۰/۶ میلی‌ثانیه) می‌باشد. در حالی‌که هر مرتبه تکـرار الگـوریتم عـددی مرتبهٔ ۳ در حدود $۸×۱۰^{-۴}$ ثانیه (۰/۸ میلی‌ثانیـه) طـول می‌کشـد. از طرفـی محاسـبهٔ خروجـی شـبکهٔ عصـبی به‌ازای هر بردار ورودی تقریبـاً بـه $۳×۱۰^{-۴}$ ثانیـه (۰/۳ میلی‌ثانیه) زمان نیاز دارد. بنابراین با توجـه بـه جـدول (۱) می‌توان گفت که در سطح دقـت ۴ روش تکـراری جدید زمان تحلیل سینماتیک مستقیم روبات را نسـبت به روش ترکیبی [15] در حدود ۰/۲ میلی‌ثانیه و نسبت به روش نیوتن-رافسون در حدود ۰/۵ میلی‌ثانیه کاهش داده است. قابل توجه است کـه ایـن نتـایج از اجـرای شبیه‌سازی‌ها در یک کامپیوتر با پردازندهٔ ۲/۴ گیگاهرتز و حافظه رم ۶ گیگابایت حاصل شده‌اند.

با توجه به موارد فوق می‌تـوان نتیجـه گرفـت کـه روش ترکیبی جدید در مقایسه با روش ترکیبی [15] و

روش نیوتن-رافسون با تعداد تکرارهای کمتر و در زمان کوتاه‌تری به دقت مطلوب دست پیدا می‌کند. این مسئله نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به‌خوبی توانسته است هدف مورد نظر را، که همان کاهش زمان تحلیل سینماتیک مستقیم روبات می‌باشد، برآورده سازد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، با هدف کاهش زمان تحلیل سینماتیک مستقیم روبات‌های موازی، یک روش ترکیبی جدید ارائه شده و کارآیی آن در ارتباط با روبات موازی 3-PSP نشان داده شده است. در این روش ابتدا توسط یک شبکهٔ عصبی مصنوعی، تخمینی از پاسخ سینماتیک مستقیم روبات ایجاد می‌شود و سپس با تکرار یک الگوریتم عددی مرتبهٔ ۳ دقت پاسخ تا حد مطلوب افزایش داده می‌شود.

نتایج حاصل از به‌کارگیری روش‌های مختلف برای حل مسئلهٔ سینماتیک مستقیم روبات موازی 3-PSP نشان می‌دهند که روش ترکیبی جدید نسبت به الگوریتم نیوتن-رافسون و هم‌چنین روش ترکیبی [15] در تعداد تکرارهای کمتر و زمان کوتاه‌تری به دقت مطلوب دست پیدا می‌کند. با بالاتر رفتن دقت مورد نظر، برتری روش پیشنهادشده در این مقاله بر سایر روش‌ها بیشتر آشکار می‌شود. در نهایت و در سطح دقت ۴ (معادل دقت 10^{-6} متر برای متغیرهای طولی و 10^{-6} رادیان برای متغیرهای زاویه‌ای) روش ترکیبی جدید زمان محاسبات مربوط به تحلیل سینماتیک مستقیم روبات را به اندازهٔ ۲۰٪ نسبت به روش نیوتن-رافسون و ۱۲٪ نسبت به روش ترکیبی [15] کاهش داده است. این دست‌آورد به‌خصوص در کاربردهایی مانند کنترل بلادرنگ که در آنها رسیدن به دقت‌های زیاد در زمان‌های هرچه کوتاه‌تر مورد نیاز است، می‌تواند عملکرد سیستم را به‌طرز قابل ملاحظه‌ای بهبود ببخشد. علاوه بر این در مواردی که تا پیش از این به‌دلیل زمان‌بر بودن تحلیل‌های سینماتیکی امکان پیاده‌سازی برخی از الگوریتم‌های کنترلی به‌صورت عملی وجود نداشته است، استفاده از روش پیشنهادی می‌تواند با کاهش زمان صرف‌شده برای تحلیل‌های سینماتیکی این امکان را فراهم آورد.

مراجع

1. Ottaviano, E. and Ceccarelli, M., "Application of a 3-DOF parallel manipulator for earthquake simulations", *Mechatronics*, IEEE/ASME Transactions on, Vol. 11(2), pp. 241-246, (2006).
2. Wang L., Wu, J., Wang, J. and You, Z., "An Experimental Study of a Redundantly Actuated Parallel Manipulator for a 5-DOF Hybrid Machine Tool", *Mechatronics*, IEEE/ASME Transactions on, Vol. 14(1), pp. 72-81, (2009).
3. Rezaei, A. and Akbarzadeh, A., "Position and stiffness analysis of a new asymmetric 2PRR–PPR parallel CNC machine", *Advanced Robotics*, Vol. 27(2), pp. 133-145, (2013).
4. Enferadi, J. and Akbarzadeh, A., "A novel approach for forward position analysis of a double-triangle spherical parallel manipulator", *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 29(3), pp. 348-355, (2010).
5. Merlet, J.P., "Direct kinematics of parallel manipulators. Robotics and Automation", *IEEE Transactions on*, Vol. 9(6), pp. 842-846, (1993).
6. Der-Ming, K., "Direct displacement analysis of a Stewart platform mechanism", *Mechanism and Machine theory*, Vol. 34(3), pp. 453-465, (1999).
7. Sadjadian, H. and Taghirad, H.D., "Numerical methods for computing the forward kinematics of a redundant parallel manipulator", *Proceedings of the IEEE Conference on Mechatronics and Robotics*, Aachen, Germany, (2004).
8. Liu, K., Fitzgerald, J.M. and Lewis F.L., "Kinematic analysis of a Stewart platform manipulator",

Industrial Electronics, IEEE Transactions, Vol. 40(2), pp. 282-293, (1993).
9. Li, Y. and Xu, Q., "Kinematic analysis of a 3-PRS parallel manipulator", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 23(4), pp. 395-408, (2007).
10. Cheng, H.H., Lee, J.J. and Penkar R., "Kinematic analysis of a hybrid serial-and-parallel-driven redundant industrial manipulator", *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 10(4), pp. 159-166, (1995).
11. McAree, P.R. and Daniel, R.W., "A fast, robust solution to the Stewart platform forward kinematics", *Journal of robotic systems*, Vol. 13(7), pp. 407-427, (1996).
12. Yang, C., Huang, Q., Ogbobe, P.O. and Han, J., "Forward kinematics analysis of parallel robots using global newton-Raphson method", *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA'09), Second International Conference on*, Vol. 3, pp. 407-410, 10-11 Oct., (2009).
13. Yang, C.F., Zheng, S.T., Jin, J., Zhu S.B. and Han, J.W., "Forward kinematics analysis of parallel manipulator using modified global Newton-Raphson method", *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 17(6), 1264, (2010).
14. Guez, A., and Ahmad Z., "Accelerated convergence in the inverse kinematics via multilayer feed forward networks", *Proceedings of Neural Networks (IJCNN), International Joint Conference on IJCNN*, pp. 341–344, 18-22 Jun., (1989).
15. Parikh, P.J. and Lam, S.S., "A hybrid strategy to solve the forward kinematics problem in parallel manipulators", *Robotics*, IEEE Transactions, Vol. 21(1), pp.18-25, (2005).
16. Chapra, S.C. and Canale, R., "*Numerical methods for engineers*", Vol. 2, McGraw-Hill, New York, (2005).
17. Darvishi, M.T. and Barati, A., "A third-order Newton-type method to solve systems of nonlinear equations", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 187(2), pp. 630-635, (2007).
۱۸. رضایی، امیر، "راه‌اندازی و کنترل روبات موازی 3-PSP"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۹۰).
19. Rezaei, A., Akbarzadeh, A., Nia, P.M. and Akbarzadeh-T, M.R., "Position, Jacobian and workspace analysis of a 3-PSP spatial parallel manipulator", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 29(4), pp. 158-173, (2013).
20. Chun, C., "A new iterative method for solving nonlinear equations", *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 178, pp. 415–422, (2006).
21. Laosiritaworn, W. and Chotchaithanakorn, N., "Artificial Neural Networks Parameters Optimization with Design of Experiments: An Application in Ferromagnetic Materials Modeling", *Chiang Mai Journal of Science*, Vol. 36(1), pp. 83-91, (2009).
22. Sekar, B.D., Dong, M.C., Shi, J. and Hu X.Y., "Fused Hierarchical Neural Networks for Cardiovascular Disease Diagnosis", *Sensors Journal, IEEE*, Vol. 12(3), pp. 644-650, (2012).
23. Boudreau, R., Levesque, G. and Darenfed, S., "Parallel manipulator kinematics learning using holographic neural network models", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 14(1), pp. 37-44, (1998).
24. Sadjadian, H., Taghirad, H.D. and Fatehi, A., "Neural networks approaches for computing the forward kinematics of a redundant parallel manipulator", *International Journal of Computational Intelligence*, Vol. 2(1), pp. 40-47, (2005).
25. Kang, R., Chanal, H., Bonnemains, T., Pateloup, S., Branson, D.T. and Ray, P., "Learning the forward kinematics behavior of a hybrid robot employing artificial neural networks", *Robotica*, Vol. 30(5), pp. 847-855, (2012).